

열파이프의 제조 및 성능시험

Manufacture and Performance Test of Heat Pipe

김 철 주*, 이 준 엽**
Chul Ju Kim, Joon Yeob Lee

1. 머리말

Heat Pipe의 제작에는 먼저 적절한 Heat Pipe 설계요건에 대한 고찰¹⁾이 선행되어야 한다. 즉 설치목적과 설치환경에 따라 Heat Pipe의 형상, 재질의 강도 등의 선택에 관한 세심한 배려가 있어야 한다. 그러나 여기에서는 제작 및 성능 시험에 한하여 간략하게 서술하고자 한다.

2. 제작방법

2.1 Heat Pipe의 구성 요소

Heat Pipe는 기본적으로 다음의 5개 요소로 구성된다. 이들은 각각 Fig.1에서 보는 것과 같이 단판(End Cap), 용기(Envelope), 위

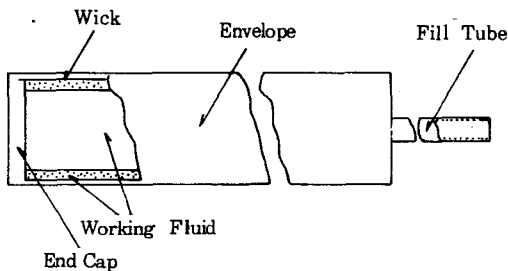


Fig. 1

크(Wick), 주입관(Fill Tube) 및 작동유체(Working Fluid)이다. Heat Pipe의 형상은 사용 목적에 따라 여러 형상의 것이 개발되어 있으나 여기서는 가장 범용적으로 이용되는 원

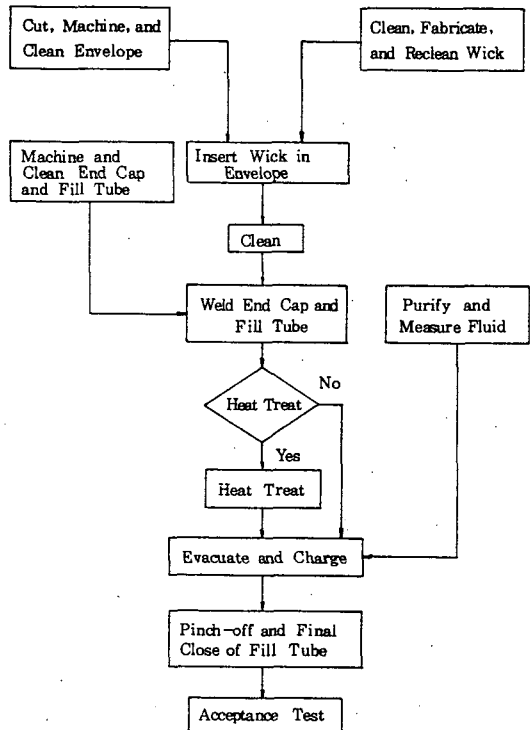


Fig. 2

* 정회원, 성균관대학교 기계공학과

** 성균관대학교 대학원

통형을 대상으로 하였다.

2.2 Heat Pipe의 제작공정

Fig.2는 Edelstein & Haslett²⁾ 등에 의한 Heat Pipe의 제작 공정을 도식화한 것이다. Heat Pipe의 제조 공정에서 가장 유의해야 할 점은 Fig.1의 각 구성 요소의 청정도(Clean-ness)에 있다. 작동 유체의 이물질의 혼입, 용기 및 Wick의 오염이나 그 재료 내부에 포함된 미세한 양의 Gas의 존재 비응축 Gas의 발생에 따른 Heat Pipe의 성능 저하의 요인이 되고 있다. 따라서 그림에서 보는 작동유체, Wick, 용기 등 각 요소의 처리과정에서는 반도체 공정 정도의 청정도가 요구된다.

2.2.1 각 요소의 가공

1) 용 기

Pipe는 소요되는 길이를 절단하여 가공후 세척 건조시켜 보관한다. 장기간의 보관이 요구될 때에는 N₂, Ar 등의 불활성 기체의 분위기 내에 유지하는 것이 중요하다. 양단 단판의 가공 및 보관도 동일하게 처리한다.

2) Wick

금속망을 사용하는 경우에는 필요한 길이 및 폭을 갖도록 절단한다. 세척 건조시킨 후 금속 환봉 및 절개된 Pipe를 이용하여 평판위에 회전시켜 성형한다. 이때 Wick의 외경이 용기의 내경보다 다소 작도록 해야 하며, 이후 다시 세척한다.

3) 주 입 관

재질은 용기의 것과 동일한 것을 이용하며, 일반적으로 길이가 약 50~60mm, 내경 2~3mm, 두께 0.5~1.0mm의 것이 많이 사용된다. 그러나, 접합 가공방법에 따라 두께의 차이가 있을 수 있다.

2.2.2 Wick, 주입구, 용기의 세척

이들 요소들은 각각의 생산 과정에서 윤활유 금속 입자 등이 표면에 부착되어 있는 경우가 많으며, 이들을 적절히 제거하는 것이 가장 중요한 과정중의 하나이다. 이러한 이물질들은 앞에서 언급한 것과 같이 비응축 Gas의 발생과 함께, Wick 내부에서 작동유체와 금속 표면과의 부착력을 약하게 함으로써 모

세관 효과의 저해 등을 초래하여 Heat Pipe의 성능을 심각하게 변화시킨다.

세척과정을 약술하면 다음과 같다.

1) 기름제거

수증기 세척 또는 Solvent 세척법 등을 적용한다. Solvent는 염소(Cl) 성분이 포함된 것으로서, Trichloroethylene, Trichloroethane 등이 많이 이용된다.

한편 Solvent와 초음파 세척 장치를 동시에 사용하는 것은 매우 효과적이다.

2) 고체입자의 제거

표면에 부착된 금속의 입자들이나 또는 유성의 입자들을 제거하는 데에는 Solvent 용액 조내에서 Brushing을 수행하는 방법이 이용된다. Solvent로서는 Sodium Carbonate, Sodium Hydroxide 등의 염기성 용액이 많이 사용된다.

3) 산화피막 제거

알루미늄, 구리, 스텐레스강의 산화 피막은 비교적 안정성이 있다. 그러나, 작동유체가 염기성 물질인 경우에는 산화피막의 분해가 발생하며 이 결과 작동유체의 산화 물질이 생성됨으로써 Heat Pipe의 성능 저하를 초래한다. 산화피막의 제거에는 산성 용액이 많이 이용된다. 예로서 동 또는 스텐레스강의 경우 묽은 황산용액, 질산용액 또는 이들의 혼합용액에 처리하는 방법으로 비교적 용이하게 수행할 수 있다.

이상의 각 단계별 작업 과정에서는 반드시 증류수를 이용하여 수 차례 세척해야 하며, 이후 알콜 용액으로 중화하여 열풍 건조로에서 건조시킨다.

2.2.3 조립 및 용접

1) Wick의 설치

금속망을 Wick로 이용하는 경우, 먼저 용기 내부에 Wick를 설치한 후 베어링용 강구를 압입시켜 Wick가 용기 내벽에 밀착하도록 한다. 이 작업에는 베어링의 크기를 점차 증가시키며 수 차례 반복한다.

금속 섬유를 Wick로 하는 경우에는 스프링을 사용하며 스프링 외벽에 금속 섬유를 말아서 이를 용기내에 삽입한다.

2) 단판 및 주입관의 용접

단판과 주입관 용기를 용접하여 일체화 하는 과정으로서, 이때 용접부위에 산화피막 또는 Scale의 생성이 우려된다. 따라서 이러한 이물질을 제거하기 위한 적절한 세척 과정이 요구된다. 용접법에 대해서는 차후에 다시 논하고자 한다.

2.2.4 용 접

Heat Pipe에 적용하는 용접법은 여러가지 방법이 있다. 재질이 알루미늄, 스텐레스강, 저탄소강의 경우에는 TIG 또는 MIG 용접이 이용된다. 동은 경우에는 플라즈마 아크 용접 또는 온용접의 사용이 일반적이다.

이러한 용접법에 있어서 공통적인 주의사항은 아래와 같다.

- (1) 필요 강도의 확보
- (2) Pin Hole 및 Crack의 방지
- (3) 용기내부의 산화방지

특히 산화방지를 위해서는 용접시 용기내부에 Ar 등 불활성 기체를 충전하는 방법 또는 이러한 기체로 충전된 용기내부에서 용접 작업을 수행하는 방법이 바람직하다.

용접후 Leak Test는 Helium Seal Test 방법이 신뢰성이 매우 높으나 고가의 장비가 요구된다. 간편한 방법으로써 고압의 질소 가스에 의한 기포발생 검사법이 많이 이용된다.

2.2.5 진공 Packing

용기 또는 Wick 재료로부터 그 내부에 포함된 Gas를 뽑아내기 위하여 진공 Packing법이 이용된다. 일반적으로 금속재료를 진공에 놓아두면 재료 내부에 함유된 Gas가 방출된다. 이 때 Gas의 방출량은 고온에서 더욱 증가한다. 이 과정은 700K 이상의 고온의 Heat Pipe에서는 필수조건이다.

재료 및 용기의 형상 크기에 따라 Gas의 방출 상태는 서로 차이가 있으나 보통 진공도 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ torr에서 2~5시간 정도가 요구된다.

2.2.6 작동유체의 탈기 및 주입

작동유체는 주입시킬 때 작동유체의 상태 즉 기체, 액체, 고체 등 상태에 따라서 적절한 방법을 적용해야 한다. Fig.3은 대기압에서 물

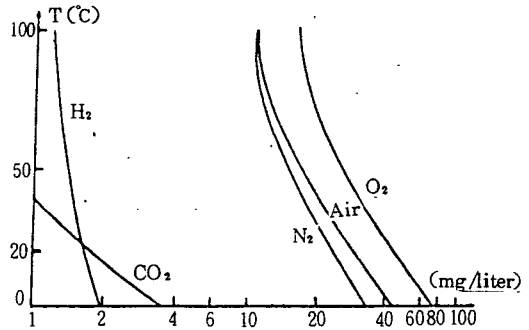


Fig. 3

내부에 포함된 기체의 용해상태도³⁾를 나타내는 일예이다.

1) 가열 축출법

상온 대기압에서 액상의 작동유체에 대하여 적용하면, 예로써 물, 에탄올 등에서 이용된다. 먼저 용액을 소요량 보다 크게 용기내에 주입시킨 후 주입관의 끝단을 임시 체결시킨 후 작동유체의 증기압이 0.2~0.4 MPa에 도달하도록 가열한다. 그 후 주입관 선단을 개방하면 주입관 내부의 증기가 분출하며, 이때 작동유체 내에 녹아 있는 기체가 분리되어 방출하게 된다.

이 경우 방출유량의 측정을 위한 적당한 조치가 필요하다.

2) 가스 액화법

상온 대기압에서 작동유체가 Ammonia, Freon 등 기체일 때 적용한다. 먼저 용기내부를 감압시킨 후 작동유체를 고압으로 주입시키거나 또는 용기의 일단을 냉각하여 작동유체를 액상으로 응축시키는 방법이 이용되며, 이후 가열 축출법을 적용한다.

이 경우 위험한 기체의 취급에는 배기계통에 중화 처리장치의 설치가 요구된다.

3) 진공펌프법

작동유체가 상온에서 고상의 물질인 경우 즉 Sodium 또는 Potassium에 이용된다. 체적 또는 질량 측정을 통하여 일정량을 용기내부에 고체상태로 주입시키고, 이를 진공 Pump를 사용하여 탈기한다. 주입과정은 Argon 등 불활성 기체의 용기내부에서 실시하는 것이 매우 효과적이다.

2.2.6 주입관의 밀봉

작동유체를 주입후 주입관의 끝단의 Valve 를 잠그고 용기로부터 5~6mm의 위치에서 길이 약 1.5cm 정도의 주입관을 입착한다. 이후 절단하고 TIG 용접, Spot 용접 또는 온 용접법을 이용하여 끝단을 밀봉한다.

한편 절단 과정에서 Leak의 우려가 있으며, 특히 스텐레스강, 탄소강의 재질에 있어서는 Clamp를 이용하는 것이 좋다. 아울러 용기를 가열 또는 냉각하여 용기내부의 압력이 대기 압에 접근된 상태에서 시행하는 것이 Leak 방지에 대한 신뢰성을 높이는 방법이다.

2.3 성능 시험⁴⁾

2.3.1 성능시험 목적

Heat Pipe의 성능시험의 목적, 방법 그리고 필요항목 등은 그 용도에 따라 서로 차이가 있다.

일반적으로 Heat Pipe의 성능은 최대수송 열량의 크기 Q_{max} 와 일정수송열량을 얻는데 필요한 응축부와 가열부의 온도차이 즉 열전 달을 h 로써 성능 지표값을 결정한다.

2.3.2 시험장치

시험에서는 Heat Pipe의 관벽의 온도와 수송열량을 정확하게 측정하는데 유의해야 한다. 먼저 온도측정에는 Fig.4와 같이 Theath Type 열전대의 이용이 신뢰성을 얻는데 더욱 좋다. 열전대의 용접은 산화피막의 생성을 고려하여 Heat Pipe 제작전에 실시하는 것이 좋다. 가열 또는 냉각장치는 단위면적당 균일한 열유속을 얻도록 유의해야 한다.

시험장치는 Heat Pipe의 시험온도에 따라 서로 차이가 있다. 일반적으로 상온범위(20~100℃)의 경우에는 Fig.5와 같은 Water

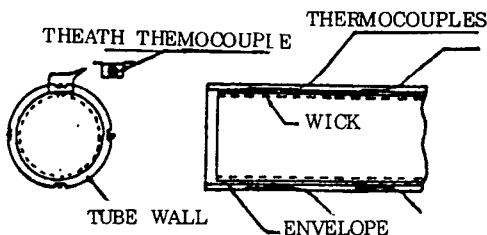
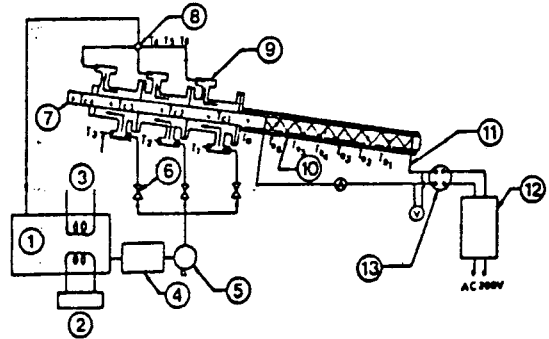


Fig. 4



- | | |
|-------------------|----------------------|
| 1. Water Tank | 2. Chiller |
| 3. Heater | 4. Flow Regulator |
| 5. Pump | 6. Flow Meter |
| 7. Heat Pipe | 8. Thermocouple |
| 9. Water Jacket | 10. Insulation Layer |
| 11. Theath Heater | 12. Power Regulator |

Fig. 5

Jacket의 냉각과 Theath Heater가 사용된다. 고온 또는 저온 시험에서는 냉각장치가 보다 복잡해지며 여기서는 상온의 경우에 한하여 서술하고자 한다.

Fig.5에서 단열재로 피복하여 주위와의 열이동을 차단하는 것은 보다 정확한 열수송량 Q 를 측정하는데 중요하다.

수송열량의 측정은 응축부의 Water Jacket를 통과하는 냉각수의 유량과 입출구 온도 차이를 이용하여 구하며, 출구점에서는 유체의 혼합온도를 구하기 위하여 2~3개의 열전대를 직렬연결하는 것이 바람직하다.

주변장치로써 수조 및 유량제어장치, 유량계통은 측정온도범위(0~80℃)에서 견딜 수 있는 것이어야 한다. 발열부는 열유속이 균일하도록 발열장치의 설치에 유의해야 하며, Theath Heater를 온용접하여 사용하거나 또는 고주파로의 이용⁵⁾이 바람직하다.

2.3.3 시험방법

입열량의 조절은 발열부의 공급열량의 변화로써 그리고 출열량의 조절은 냉각수의 유량 및 냉각수의 온도를 변화시킴으로써 얻을 수 있다.

이렇게 하여 Heat Pipe의 온도 T_e , T_A , T_c 을 설정값에 일치시키고, 정상상태에 도달했을 때 각점의 온도 및 열수송량을 측정한다.

또한 입·출열량을 단계적으로 증대시키면서 각 단계에서의 온도값의 분포와 열수송량의 측정을 수행하며 이러한 과정을 열수송량이 한계에 도달할 때까지 진행한다.

Fig.6에서는 Al-Freon Heat Pipe에서 얻어진 $T=60^{\circ}\text{C}$ 에서의 성능 측정 결과의 한 예를 나타내고 있다. 먼저 냉각수 온도를 T_A 보다 조금 낮은(약 50°C) 값에 유지하고 적은 입열량을 작용하며, 그리고 정상상태에 도달할 때 각 점의 온도 및 냉각수 유량을 측정하고, 이 결과로부터 열수송량을 측정한다.

이후 입열량을 단계적으로 증가하면서(10~20 W) 또한 냉각수를 온도를 낮게 하거나 또는 유량을 증대시키면서 위 과정을 반복 수행한다. 이 때 어느 상태에서 Heat Pipe 증발부에서 Dry Out 이 발생하면, 증발부 온도가 급격히 상승하며, 동시에 단열부 및 냉각부의 온도가 급속히 강해한다. 이 결과로부터 최대 열수송량 Q_{max} 를 Dry Out가 일어나기 전의 값으로 결정할 수 있다.

한편 Sonic Limit, Boiling Limit 등에 있어서 발생하는 현상도 위의 경우와 유사하게

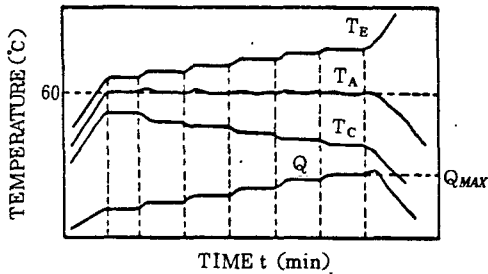


Fig. 6

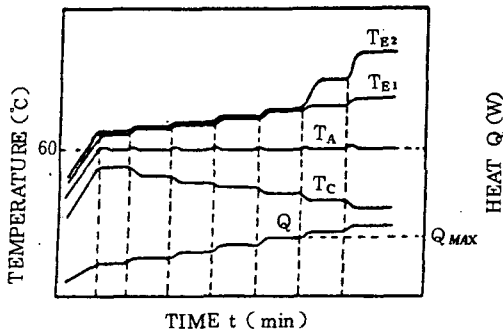


Fig. 7

나타나는 경우가 많이 있다. 그러나 경우에 따라서는 증발부의 내면에서 부분적으로 핵비등 상태로부터 막비등 상태로 천이되어 국부적인 Dry Out 현상이 발생하며, 이 때 이 부분에서 국소적인 온도상승을 초래한다. 이러한 상태를 표시한 것이 Fig.7이다.

이러한 경우 국소적 Dry Out가 발생하기 전 단계를 한계값으로 취한다. 그러 이 이상의 열 입력에 대해서도 열수송량의 급격한 저하가 나타나지 않는 경우도 있다.

2.3.4 성능치의 계산

계산 최대 수송량 이외의 Heat Pipe의 성능을 나타내는 지표로서 열전달률 h 는 실험 결과로부터 다음 식으로 구한다.

여기서 T_e , T_c 및 T_A 는 각각 증발부, 응축부, 단열부의 평균 온도이며, Q 는 열수송량이다. 그리고, A_e , A_c 는 각각 증발부와 응축부의 관내 표면적, h_e , h_c 는 각각 증발부 및 응축부의 열전달 계수이다. 각 성능치들의 계산식 및 단위는 다음과 같다.

$$h_e = \frac{Q}{(T_e - T_A) A_e}, \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

$$h_c = \frac{Q}{(T_A - T_c) A_c}, \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

이들 성능치 h 또는 Q_{max} 등은 주어진 Heat Pipe에 대해서 증력방향과의 경사각 θ , 단열부 온도 T_A 등에 따라 서로 다른 경향을 나타내며, 여기서는 이들에 대한 자세한 언급은 생략하고자 한다.

또한 중요한 지표로써는 Heat Pipe의 수명을 예측하기 위한 시험이 중요한 과제이나 여기서는 생략하였다.

3. 맺음말

이상에서 Heat Pipe의 제작 및 성능시험방법, 성능시험의 예를 열거하였으나 일반적인 사항들을 밝힌다. 실제에 있어서는 각 제작 과정에서 실험실 또는 공장생산의 경우에 따라 많은 차이들이 있을 수 있으며 공개되지 않은 내용도 적지 아니하다.

현재 국내에서의 Heat Pipe 산업은 거의 활

성화 되어 있지 않으며, 따라서 산업화를 위해서는 국외의 기술에 의존하지 않으면 안된다.

국외에서는 그 동안의 기술 축적, 산업화와 함께 Heat Pipe의 규격화를 시도하는 시점에 있다. 국내에서도 학계 및 산업계에서 보다 큰 관심을 가지고 산업화를 위한 기술축적에 노력해야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. S.W. Chi., "Heat Pipe Theory and Practice," pp.157-194, Hermisphere Publishing Corp. 1976.
2. Edelstein, F., and Haslett, R., "Heat Pipe Manufacturing Study," Grumman Aetospace Corp. Report to NASA, Aug. 1974.
3. A. Mojtabi, Contribution a L'etude des Caloduc a Eau, pp.41, These de Docteur Ingenieur, ENSMA France, 1976.
4. 實用ヒートパイプ, pp.74~85. 日本ヒートパイプ協會, 日刊工業, 新聞社, 1985.
5. P. Gagneux, "Contribution a L'etude des Caloduc a Sodium," These de Doctew Ingenieur, ENSMA France, 1979.